Evaluation von Wissensrepräsentationssystemen[1]

VERBMOBIL-Report

AP 11.8

Christel Kemke
DFKI
Stuhlsatzenhausweg 3
66123 Saarbrücken
E-Mail: kemke@dfki.uni-sb.de

[1]Vielen Dank an Walter Kasper für zahlreiche Anregungen und Hinweise bei der Ausarbeitung dieses Berichtes.

Zusammenfassung

Ziel dieses Berichtes ist eine Evaluation von aktuellen Wissensrepräsentationssystemen, insbesondere terminologischen Logiken. Nach Aufstellung der relevaten Evaluationskriterien erfolgt zunächst eine allgemeine Behandlung von KL-ONE - der Urmutter der terminologischen Logiken -, wobei schon einige inhärente kritische Punkte der zu behandelnden Systeme aufgezeigt werden. Anschließend werden Syntax- und Semantikdefinitionen von KL-ONE-Derivaten vorgestellt, um deren Sprachumfang zu vergleichen. Neben den gängigen KL-ONE-Derivaten wird auch die in LILOG verwendete Repräsentationssprache vorgestellt. Abschließend erfolgt ein zusammenfassender Vergleich der Systeme.

Hierbei stellt sich heraus, daß insbesondere die Systeme LOOM, CLASSIC, KRIS und BACK bezüglich des verrwendeten Sprachumfangs und der Effizienz der Inferenzen gut abschneiden. Die Systeme BACK und KRIS sind dabei für Verbmobil besonders relevant, da sie relativ leicht verfügbar sind. Außerdem zeichnet sich BACK durch ein gut strukturiertes Handbuch aus und eine schnelle neue Implementierung In C. Kritisch bei allen vorgestellten Systemen ist die Darstellung zeitlicher Zusammenhänge (Ereignisse, Aktionen); hierzu liegen jedoch schon Forschungsergebnisse für die Erweiterung der terminologischen Sprachen vor.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **2**

2 Evaluationskriterien **4**

3 KL-ONE und seine Derivate - Einige allgemeine Betrachtungen **5**
3.1 Sprachbeschreibung 7
3.1.1 Konzepte 8
3.1.2 Rollen 9
3.2 Die A-Box 13
3.3 Weitere Probleme mit KL-ONE und seinen Derivaten 13

4 KL-ONE-Derivate: Syntax- und Semantikdefinitionen **14**
4.1 *FL* 14
4.1.1 Syntax 14
4.1.2 Semantik 14
4.1.3 Subsumption 15
4.2 KRYPTON 15
4.2.1 Syntax 15
4.2.2 Symboltabelle 15
4.2.3 Semantik 16
4.3 KL-TWO 16
4.4 LOOM 17
4.5 BACK 17
4.6 QUIRK 20
4.6.1 Syntax 20
4.6.2 Semantik 20
4.7 SB-ONE 21
4.7.1 Syntax 21
4.7.2 Semantik 23
4.8 ALC 25
4.9 Weitere Sprachen 25

5 LILOG **27**

6 Zusammenfassender Vergleich der Systeme **28**
6.1 Ein empirischer Vergleich einiger KL-ONE-Derivate 29

7 Einsatz von KL-ONE-Derivaten in Verbmobil **30**

1 Einleitung

Die Darstellung von Weltwissen ist einer der Hauptaspekte bei der Entwicklung von Systemen der Künstlichen Intelligenz. Im Laufe der Entwicklung der KI hat sich gezeigt, daß intelligente Systeme sich nicht nur auf der Basis allgemeiner Problemlösungsverfahren realisieren lassen, sondern daß eine große Menge von allgemeinem Weltwissen notwendig ist, um intelligentes Verhalten zu simulieren. In einem System wie Verbmobil ist Wissen über die Welt, über den Diskursbereich, notwendig, um adäquate Übersetzungsprozesse zu gewährleisten. Da in Verbmobil Dialoge über Terminvereinbarungen geführt werden sollen, ist insbesondere die Darstellung zeitlichen Wissens, d.h. Wissen über Aktionen und Ereignisse und deren Beziehung untereinander, von Bedeutung.

In früheren KI-Systemen zur Sprachanalyse wurden vorwiegend logische Strukturen oder die sogenannten *semantischen Netze* zur Darstellung des semantischen Gehaltes einer sprachlichen Äußerung benutzt. Nachteil der logischen Strukturen war, daß sie zwar relativ viel sprachliche Konstrukte zur Verfügung stellten, mit denen die Semantik eines natürlichsprachlichen Ausdrucks beschrieben werden konnte, aber die Verarbeitung mittels eines Computers war unklar. Die Krux an semantischen Netzen war, daß sie zwar über eine relativ große und adäquate Menge an Knoten und Kanten verfügten, die den natürlich-sprachlichen Ausdrücken nahe kam, doch die Verarbeitungsprozesse auf diesen markierten Graphen, die Semantik der Knoten und Kanten, blieb ebenfalls weitgehend unklar.

Aus dieser Misere heraus wurde von Brachman und anderen die *KL-ONE*-Sprachfamilie entwickelt. KL-ONE und seine Derivate stellen Wissensrepräsentationssprachen dar, die auf einer konzeptuellen Hierarchie mit Vererbung basieren und eine klare, formal definierte Syntax und Semantik der strukturbildenden Operatoren beinhalten. Mit KL-ONE begann sozusagen eine neue Ära der Wissensrepräsentationssprachen, die nun bezüglich ihrer Semantik und der verwendeten Verarbeitungsprozesse einer formalen Analyse zugänglich wurden. KL-ONE und seine Derivate basieren auf einem sogenannten *terminologischen* Anteil (T-Box), in dem allgemeine, definitorische Aussagen über die Welt gemacht werden können, und einem *assertionalen* Anteil (A-Box), in dem Aussagen über einzelne Individuen formuliert werden können, die wiederum in Einklang mit dem terminologischen Anteil stehen müssen. Auf dieser Basis können Inferenzen über Individuen der modellierten Welt relativ kompakt formuliert werden. Wurde z.B. in der terminologischen Wissensbasis definiert, daß ein Elephant vier Beine hat, und wurde im assertionalen Anteil zugesichert, daß Jumbo ein Elephant ist, so kann inferiert werden, daß Jumbo vier Beine hat. Außerdem werden Eigenschaften eines Superkonzeptes vererbt. Wurde z.B. in der terminologischen Wissensbasis definiert, daß ein Elephant ein Säugetier ist, so werden diese und alle damit verbundenen Eigenschaften auf Jumbo vererbt. Zentral für diese terminologischen Sprachen sind das Konstrukt des *Konzeptes* und der *Rolle*. Konzepte definieren Klassen von Entitäten der zu modellierenden Welt und Rollen beschreiben diese bzw. Zusammenhänge zwischen ihnen näher.[1]

Wissensrepräsentationssprachen werden in einigen natürlich-sprachlichen Systemen direkt zur Darstellung des semantischen Gehaltes einer sprachlichen Äußerung verwendet, in anderen Systemen, wie dies auch bei Verbmobil der Fall sein soll, wird zunächst eine unabhängige Semantikdarstellung erzeugt und dann werden auf der Basis einer Wissensrepräsentationssprache Inferenzen aus der sprachlichen Äußerung gezogen, um weiteres Wissen über den Zusammenhang oder Implikationen der Aussage zu erhalten.

[1] Wir werden hierauf noch im nächsten Kapitel näher eingehen.

Vorteil der terminologischen Sprachen gegenüber herkömmlichen logik-basierten Sprachen ist der eingeschränkte Sprachumfang, der relativ schnelle und kostengünstige Inferenzen gegenüber einem allgemeinen Beweiser der Prädikatenlogik erster Stufe ermöglicht. Außerdem stellen Wissensrepräsentationssprachen gerade adäquate Sprachkonzepte vor, die eine möglichst problemlose und angemessene Darstellung des Weltwissens ermöglichen sollen.

KL-ONE ist nun seit fast zehn Jahren das aktuelle Paradigma innerhalb der Wissensrepräsentation. Es entstand im Laufe dieser Zeit eine Vielzahl von Derivaten mit mehr oder weniger ähnlichem Sprachumfang, auf die in den folgenden Abschnitten näher eingegangen wird. Bevor die Syntax und Semantik dieser Sprachabkömmlinge vergleichend dargestellt wird, erfolgt eine ausführliche Analyse der Grundlagen dieser Sprachfamilie, wobei auch einige kritische Punkte aufgezeigt werden. Abschließend erfolgt eine vergleichende Darstellung der für Verbmobil relevantesten Sprachen.[2]

[2] Ein empirischer Vergleich terminologischer Sprachen (BACK, CLASSIC, KRIS, LOOM, MESON und SB-ONE), der insbesondere Laufzeitmessungen der einzelnen Systeme beinhaltet, kann [JHP92] entnommen werden.

2 Evaluationskriterien

Das hauptsächliche Evaluationskriterium der nachfolgenden Studie ist die Adäquatheit der Repräsentationssprachen, d.h. die Ausdrucksfähigkeit und somit der Umfang an zur Verfügung stehenden Operatoren.

Die hier zitierten Sprachen dienen in erster Linie dazu, terminologisches, begriffliches Wissen zu repräsentieren. Problematische Fälle hierbei sind räumliches und zeitliches Wissen und Wissen über dynamische Entitäten (Aktionen und Ereignisse). Gerade diese Art von Wissen ist für das Verbmobil-System relevant. Außerdem wird i.a. das Wissen über individuelle Objekte unterstützt, sofern das System über eine sogenannte A-Box verfügt. Weitere Kriterien sind die Verwendung von Regeln und die Möglichkeit, Defaults darzustellen, um prototypisches Wissen und Vorannahmen zu realisieren.

Die formale Darstellung ist bei den meisten Systemen durch eine prädikatenlogisch fundierte Semantik gegeben.

Die verwendeten Inferenzstrategien sind bei allen Systemen die Vererbung von Informationen auf Subkonzepte und ein Klassifizierer, der neu definierte Konzepte in die Vererbungshierarchie einordnet. Zusätzlich verwenden einige Systeme Beweiser in der A-Box. Außerdem werden in manchen Systemen zusätzliche Inferenzmechanismen angeboten wie z.B. einen Realizer, der in der A-Box beschriebene Individuen einem Konzept der T-Box zuordnen. In einigen Systemen finden sich TELL- und ASK-Konzepte wieder, durch die der Aufbau der Wissensbasis bzw. Anfragen an die Wissensbasis formuliert werden können. Leider sind die meisten Systembeschreibungen an dieser Stelle etwas unzulänglich.

Ein weiteres Kriterium ist die Verarbeitungsgeschwindigkeit, d.h. wie schnell können die oben beschriebenen inferentiellen Mechanismen durchgeführt werden. Hierzu werden wir eine am DFKI durchgeführte Studie zitieren.

Die Benutzungsoberfläche ist für die einzelnen Systeme relativ unterschiedlich. Sie umfaßt menü-orientierte Steuerungen ebenso wie ausgefeilte Graphikoberflächen. Leider ist in der Literatur nur wenig Information darüber zu finden, wie die Benutzungsoberfläche gestaltet ist.

Über die Erweiterbarkeit der Systeme läßt sich leider ohne die entsprechende Software keine allgemeingültige Aussage machen. Allerdings dürfte der Aufwand hierfür um so größer sein, je mehr inferentielle Prozesse angeboten werden, da diese für die neuen Sprachkonzepte angepaßt werden müssen.

Die Verfügbarkeit ist für alle der im folgenden beschriebenen Systeme recht gut, da sie fast alle universitäre Entwicklungen darstellen und somit relativ frei verfügbar sind. Über die vorausgesetzte Hard- und Software lassen sich für viele Systeme keine detaillierten Angaben machen. Die meisten Systeme dürften jedoch in den gängigen Programmiersprachen Lisp und Prolog entwickelt sein und auf handelsüblichen neueren Maschinen laufen.

3 KL-ONE und seine Derivate - Einige allgemeine Betrachtungen

Die ursprünglichen Konzepte des KL-ONE-Repräsentationsparadigmas, auf denen auch alle späteren Vertreter dieser Sprachfamilie basieren, werden relativ ausführlich, wenn auch ohne Angabe einer formalen Semantik, in [BS85] diskutiert. Die Ideen, die KL-ONE zugrundeliegen, resultierten aus einer kritischen Auseinandersetzung Brachmans [Bra79] mit den damals recht populären sogenannten *semantischen Netzen*, die eine sehr suggestive Darstellungsweise für Sachverhalte, natürlich-sprachliche Aussagen usw. boten, deren Semantik jedoch - also die Bedeutung der so suggestiv benannten Knoten und Kanten - weitestgehend im Unklaren blieb. Diese Misere, mit der sich auch Woods im Detail beschäftigte [Woo75], führte zu einer wesentlich skeptischeren Einstellung bezüglich der bis dahin verwendeten Repräsentationsformalismen und -sprachen.

Nach einer eingehenden Analyse der Struktur und Verwendung zur damaligen Zeit existierender Ausprägungen semantischer Netze, kam Brachman zu dem Resultat, daß die Sprachprimitiva semantischer Netze, d.h. die Konstrukte, für die entsprechende Interpretationsprozesse im System programmiert sind, in fünf verschiedene Repräsentationebenen eingeordnet werden können [Bra79]:

- die *Implementationsebene*,
  auf der Netzwerkprimitiva lediglich Graphen, also Knoten und gerichteten Kanten, entsprechen,

- die *logische Ebene*,
  auf der Knoten Prädikate sowie Aussagen und Kanten logische Beziehungen darstellen,

- die *epistemologische Ebene*,
  auf der Grundprimitiva zur strukturierten Darstellung konzeptueller Entitäten bereitgestellt werden,

- die *konzeptuelle Ebene*,
  auf der grundlegende, weitestgehend sprachunabhängige konzeptuelle Entitäten festgelegt sind, und

- die *linguistische Ebene*,
  auf der beliebige natürlichsprachliche Ausdrücke auftreten können.

Die epistemologische Ebene, auf der Primitiva zur Strukturierung intensionaler Beschreibungen konzeptueller Entitäten und zur Darstellung von Beziehungen zwischen konzeptuellen Entitäten bereitgestellt werden sollen, wurde von Brachman zusätzlich eingeführt. Das Konzept der 'structured inheritance networks', das in KL-ONE einen paradigmatischen Vertreter hat, wurde von Brachman als allgemeines Konzept für Sprachen der epistemologischen Ebene entworfen.

Die von Brachman vorgenommene Einteilung der Repräsentation konzeptuellen Wissens in die oben genannten fünf Ebenen kann man vom heutigen Standpunkt aus in einer eher konstruktiven Sicht, die eine Anleitung zur Wissensrepräsentation statt eine Analyse der bestehenden Strukturen ergeben soll, etwas modifizieren.

Die Implementierungsebene spielt heutzutage eigentlich keine Rolle; Netzwerkstrukturen können durch markierte Graphen formal beschrieben und in einer möglichst adäquaten Programmiersprache implementiert werden.

Die logische Ebene ist m.E. nicht in der Striktheit von der epistemologischene Ebene zu trennen, wie Brachman es getan hat; vielmehr sind Logiken quasi Formalisierungen eines solchen epistemologischen Apparates, bei denen grundlegende Primitiva z.B. Prädikate, Funktionen, Konnektoren und Quantoren und darauf aufbauend Terme und Formeln sind. Die Betrachtung einer getrennten Logikebene resultiert vermutlich daraus, daß formale Logiken, insbesondere die Aussagenlogik und die Prädikatenlogik erster Stufe, weitverbreitet sind und ihre Bedeutung normiert ist. Daher werden Sprachkonstrukte aus den formalen Logiken oft direkt, ohne Angabe einer Semantik, in Repräsentationssprachen übernommen. Außerdem werden Semantikdefinitionen für neu eingeführte Sprachen oft auf Semantiken, die in der formalen Logik bekannt sind, zurückgeführt, wie dies auch in den späteren Arbeiten zu KL-ONE geschah. Dadurch ergibt sich formal eine Anbindung oder Einbettung von Sprachen der epistemologischen Ebene an formale Logiken. Ein dritter Grund mag sein, daß formale Logiken relativ wenig Grundprimitiva zur strukturellen Beschreibung von Konzepten bereitstellen, die für eine adäquate Repräsentation konzeptueller Entitäten und Zusammenhänge oft unzureichend sind. Daraus läßt sich jedoch nicht der Schluß ziehen, daß Logiken ein anderes, niedrigeres Repräsentationslevel darstellen.

Die wesentlichen und interessanten Fragen der Wissenrepräsentationsforschung liegen sicher im Bereich der epistemologischen und konzeptuellen Primitiva, wobei sich die linguistische Ebene, die gerade bei dem Entwurf von Wissensbasen für natürlichsprachliche Systeme eine wesentliche Rolle spielt, aufgrund der interaktiven Beeinflußung von Sprache und Denken zum Teil in der konzeptuellen Ebene wiederfindet. Die zentralen Fragen, die bisher nicht zufriedenstellend gelöst sind und auch nie als vollständig gelöst betrachtet werden können, sind:

- *Welche grundlegenden Sprachkonzepte auf epistemologischer und konzeptueller Ebene benötigt man?*
- *Wie kann die Bedeutung dieser Sprachkonzepte beschrieben werden?*

Die vorliegende Arbeit setzt im wesentlichen auf der in KL-ONE und seinen Derivaten festgelegten Sprachkonzeption auf; es werden jedoch einige Erweiterunsgmöglichkeiten und Modifikationen der grundlegenden Sprachkonstrukte diskutiert. In Ergänzung zu den Grundmotiven, die zur Entwicklung und Ausarbeitung von KL-ONE geführt haben, sollte ein grösseres Gewicht auf die Behandlung der konzeptuellen - oder eher: ontologischen - Ebene gelegt werden. Eine solche ontologische Ebene könnte man auch als zusätzliche Ebene zwischen der epistemologischen und der konzeptuellen oder semantischen Ebene ansiedeln. Auf dieser ontologischen Ebene sind grundlegende Beschreibungsprimitiva festzulegen, die für große Klassen von Entitäten, d.h. elementare, generelle Konzepte wie z.B. 'materielles Objekt' oder 'dynamische Entität', gelten; solche grundlegenden ontologischen Primitiva könnten z.B. 'Lokation im Raum' und 'Lebensalter' für materielle Objekte oder 'Zeitdauer' im Fall von dynamischen Entitäten sein. Das Motiv, das man für eine intensivere Behandlung der ontologischen Ebene anführen kann, liegt darin, eine stärkere Unterstützung für den Aufbau umfassender Wissenbasen für komplexe Domänen zu bieten. Ähnlich wie beim Software Engeneering oder dem konzeptuellen Entwurf von Datenbanken steht der Wissen-ingenieur, der Entwickler der Wissensbasis, vor dem Problem, welche Objekte, Relationen etc. er als zentrale Konzepte einer Wissensbasis modellieren möchte und wie diese Konzepte im einzelnen beschrieben werden sollen. Eine wichtige Zielsetzung im Bereich der Wissenrepräsentationsforschung sollte daher auch die Entwicklung eines geeigneten ontologischen Apparates sein, der grundlegende Sprachkonzepte für die Beschreibung einer Domäne auf semantischer Ebene bereitstellt. Eine Voraussetzung für eine sinnvolle Forschung in dieser Richtung ist die Annahme, daß es überhaupt einen Satz solcher ontologischer Primitiva geben kann, der hinreichend domänenunabhängig ist und damit für die Beschreibung einer großen Klasse ähnlicher Konzepte verwendet werden kann.

Die ansatzweise Entwicklung eines solchen ontologischen Apparates wurde z.B. von Schank mit seiner Conceptual Dependency Theory verfolgt [Sch72] [SR74]. Es gibt außerdem eine Vielzahl von Arbeiten, die sich für einzelne Domänen oder spezielle Aufgabenstellungen, wie z.B. die Beschreibung technischer Systeme im Bereich des qualitativen Modellierens, die Frage nach grundlegenden ontologischen Primitiven zur Modellierung der betreffenden Entitäten stellen. Ausführliche, umfassende Arbeiten einer generelleren Natur gibt es bisher allerdings kaum. Es sei an dieser Stelle noch darauf hingewiesen, daß die Trennung zwischen Ontologie und Epistemologie oft nicht klar durchführbar ist. So bezeichnen einige Autoren Sprachkonstrukte, die nach Brachman auf der epistemologischen Ebene anzusiedeln sind, als ontologische Primitiva.

Diese hier postulierte ontologische Ebene würde in etwa mit der konzeptuellen Ebene nach der Auffassung Brachman's übereinstimmen. Man kann jedoch noch eine weitere Ebene fordern, die man ebenfalls als konzeptuelle Ebene bezeichnen könnte, nämlich eine Ebene, auf der die konkreten Beschreibungen einzelner Konzepte angesiedelt sein müssen, die jedoch, da Konzepte nicht unbedingt mit sprachlichen Ausdrücken übereinstimmen, nicht mit der linguistischen Ebene zusammenfällt. Obwohl sich der Entwurf von Wissensbasen in KL-ONE, das insbesondere bei der Entwicklung natürlichsprachlicher Systeme verwendet wird, meist stark an sprachlichen Gegebenheiten orientiert, finden sich doch immer Konzepte in diesen Wissenbasen, die keine direkte Entsprechung in einem einfachen natürlichsprachlichen Ausdruck, i.e. Wort, besitzen. Eine Übereinstimmung dieser Ebene mit der linguistischen würde dann auftreten, wenn man mittels der Repräsentationssprache nur natürlichsprachliche Begriffe definiert und in den Definitionen auch nur solche verwendet, was praktisch jedoch nie der Fall ist.

Die linguistische Ebene müßte genaugenommen noch auf dieser zweiten konzeptuellen Ebene aufsetzen, die wiederum zur Bedeutungsrepräsentation der natürlichsprachlichen Termini verwendet werden kann. Diese Trennung wird allerdings in auf KL-ONE basierenden Systemen bisher kaum durchgeführt; vielmehr gibt es im allgemeinen Übersetzungsprozesse, die Bedeutungsrepräsentationen natürlichsprachlicher Ausdrücke oder einfache lexikalische Einträge auf entsprechende KL-ONE-Strukturen abbilden.

3.1 Sprachbeschreibung

KL-ONE besteht aus grundlegenden epistemologischen *Strukturtypen*, und zwar sind dies *Konzepte* und *Rollen*, und aus *strukturbildenden Operatoren*, wie z.B. *Spezialisierung* von Konzepten und *Restriktion* und *Differenzierung* von Rollen.[3] Statt von *Konzepten* werden wir

[3] Die folgende Beschreibung des KL-ONE-Sprachkonzeptes versucht, die in [BS85] gegebenen, fast ausschließlich informellen, durch Beispiele unterlegten Ausführungen möglichst genau zu reflektieren. Diese möglichst exakte Wiedergabe erfolgt vor dem Hintergrund, daß in späteren Formalisierungen einige Ungenauigkeiten bzw. Abweichungen von der originalen intendierten Interpretation dieser Sprachkonstrukte

im folgenden auch von *Klassen* oder *Kategorien* sprechen, wenn der klassifikatorische Aspekt betont werden soll; für *Rollen* werden auch die Begriffe *Attribut*, *Merkmal* und *Eigenschaft* verwendet.

KL-ONE-Netzwerke sind mittels dieser Strukturtypen und den strukturbildenden Operatoren aufgebaute 'structured inheritance networks', wobei die hierarchische Organisation, die die Grundlage der Vererbung von Beschreibungen innerhalb des Netzes ist, durch die Spezialisierung von Konzepten entsteht. Die Spezialisierung soll, ausgehend von einigen primitiven Basiskonzepten, durch die Definition weiterer Konzepte mittels der Operatoren unter Verwendung der Basiskonzepte erfolgen. Die Konzepte, die durch ein definiertes Konzept spezialisiert werden, werden auch als dessen *Superkonzepte* bezeichnet, und das spezialisierende Konzept als *Subkonzept* der generelleren Konzepte.

3.1.1 Konzepte

Konzepte *(concepts, structured conceptual objects)* können als Entsprechungen zu Begriffen, generischen Termen (*generic terms*, nach [Qui60]) etc. angesehen werden. Formal kann man sie bei einer Rückbeziehung auf die Prädikatenlogik als einstellige Prädikate auffassen. Ein Konzept ist durch folgende Komponenten intensional beschrieben:

- eine Menge von Superkonzepten,
- eine Menge von Rollen und
- eine Menge von strukturellen Beschreibungen *(structural descriptions)*.

Diese drei Bestandteile machen insgesamt die *Definition eines Konzeptes* aus. Auf extensionaler Ebene entsprechen Konzepte Mengen von Individuen aus dem Individuenbereich und Rollen zweistelligen Relationen über dem Individuenbereich.

Die *Superkonzepte* eines Konzeptes c sind all diejenigen Konzepte, von denen c seine definitorischen Beschreibungen, d.h. Rollen und strukturelle Beschreibungen, erbt; diese Beschreibungen können für c noch modifiziert werden. Extensional bedeutet dies, daß die Extension von c eine Teilmenge jeder der Extensionen seiner Superkonzepte ist.

Rollen stellen, wie oben schon gesagt, beliebige Beziehungen zwischen Konzepten dar, die intensional als Attribute oder funktionelle Rollen aufzufassen sind und auf extensionaler Ebene zweistelligen Relationen entsprechen.

Strukturelle Beschreibungen dienen dazu, Beziehungen zwischen Rollen zu definieren, wobei bereits definierte Konzepte verwendet werden können. Diese bereits definierten Konzepte gehen als sogenannte *Parametric Individual Concepts*, d.h. als eine Art individualisierter Konzepte, bei denen die Werte gewisser Rollen festgelegt sind, in die Beschreibung des zu definierenden Konzeptes ein. Die Verbindung zwischen dem zu definierenden Konzept und dem parametrisierten individuellen Konzept, das die strukturelle Beschreibung konstituiert, besteht darin, daß Rollen des zu definierenden Konzeptes gleichgesetzt werden mit dem individuellen Konzept.

Ein Spezialfall der strukturellen Beschreibung ist das Konstrukt der *Rolle-Wert-Abbildung (role value map)*, durch das Beziehungen zwischen den Werten verschiedener Rollen eines Konzeptes, z.B. Gleichheit, ausgedrückt werden können. Auf extensionaler Ebene bedeutet dies, daß die betreffende Restriktion bzgl. der Rollenfüller für jedes Individuum, das zu dem

auftreten.

betreffenden Konzept gehört - anders gesagt: jede Instantiierung - erfüllt sein muß. Dies ist äquivalent zur Sortenbeschränkung, wie es in einigen Repräsentationssprachen formuliert wird.

Statt einfacher Rollen werden bei strukturellen Beschreibungen oft sogenannte *Rollenketten (role chains)* verwendet, die der Komposition von Relationen entsprechen.

Das Konstrukt der strukturellen Beschreibung ist relativ komplex und schwierig zu handhaben; daher ist es in den meisten KL-ONE-Derivaten und den einschlägigen Semantikbeschreibungen nicht mehr vorzufinden.

Die genannten "Komponenten" eines Konzeptes stellen die intensionale Beschreibung des Konzeptes dar. Die Semantik von KL-ONE-Sprachkonzepten wird in den späteren Formalisierungen meistens modelltheoretisch angegeben, durch Interpretation auf der Basis einer Struktur D, wobei diese Struktur einfach eine Menge von Individuen ist. Die Semantik eines Konzeptes wird dabei gleichgesetzt mit seiner Extension, also der Menge der Individuen, die der Definition, i.e. der intensionalen Beschreibung des Konzeptes, genügen.

Ohne an dieser Stelle näher zu spezifizieren, wie die Definition eines Konzeptes im Detail aussehen soll, gehen wir davon aus, daß eine solche Definition gegeben ist und bezeichnen sie mit

$$def(c)$$

für ein beliebiges Konzept c. Die Semantik von c bei einer gegebenen Struktur D ist dann seine Extension

$$\varepsilon(c) := \{d \in D | d \text{ erfuellt } def(c)\}$$

Die Menge der Modelle einer Wissensbasis, die aus den Konzepten $c_1, ..., c_n$ besteht, ist, bei einer vorgegebenen Struktur D, die Menge aller Interpretationen, unter denen die Interpretation von c_i mit der Interpretation von $def(c_i)$ übereinstimmt für $i = 1, ..., n$.

Als spezielle Art von Konzepten werden in [BS85] sogenannte *Individuelle Konzepte* (Individual Concepts) eingeführt. Hierbei handelt es sich um Konzepte, die höchstens ein Individuum denotieren, d.h. deren Extension höchstens ein Element enthält.

3.1.2 Rollen

Rollen stellen Beziehungen beliebiger Art zwischen Konzepten dar; das heißt auch, daß nicht unterschieden wird zwischen z.B. Merkmalen oder Eigenschaften eines Konzeptes und Relationen zwischen verschiedenen Konzepten. In einer Parallelisierung zur Prädikatenlogik können Rollen auch gleichgesetzt werden mit zweistelligen Prädikaten bzw. extensional mit Relationen.

In den einschlägigen KL-ONE-Artikeln können bzgl. der Behandlung von Rollen gewisse Differenzen festgestellt werden.

Auf der einen Seite werden Rollen in erster Linie oder ausschließlich im Zusammenhang von Konzeptdefinitionen betrachtet und nicht als eigenständige Strukturtypen, für die ebenfalls eigene Operatoren existieren. Wird eine Rolle als Bestandteil einer Konzeptdefinition angegeben, bleiben die Rolle und auf extensionaler Ebene die zugehörige Relation selbst unverändert, obwohl sich z.B. ihr Vor- oder Nachbereich im Kontext dieses Konzeptes geändert haben kann, da das betreffende Konzept nur eine Teilmenge des Vorbereichs darstellt oder für den Nachbereich eine sogenannte *Wertrestriktion* (Value Restriction, kurz: VR) angegeben wurde, die ein Konzept spezifiziert, dem alle Rollenfüller für diese Rolle im Kontext dieses Konzeptes angehören müssen. Die Modifikation der ursprünglich gegebenen Rolle wird jedoch nicht explizit als neue bzw. modifizierte Rolle angegeben, sondern es findet nur eine Modifikation des betreffenden Konzeptes statt. Diese Wertrestriktion wird oft auch als Role Value Map bezeichnet.

Beispiel: Ein Großvater ist ein Vater, von dem mindestens ein Kind Elter ist.

Auf der anderen Seite kann man Rollen als eigenständige Strukturen behandeln, für die - ebenso wie für Konzepte - Operatoren angeben werden können, die Rollen spezialisieren, Beziehungen zwischen Rollen festlegen etc. Wie in obiger Sicht werden Rollen zunächst als (beliebige) Relationen aufgefaßt, die jedoch spezialisiert werden, indem ihr Vor- oder Nachbereich durch Bezug auf Konzepte, zu dessen Definition sie gehören bzw. die eine Wertrestriktion spezifizieren, eingeschränkt wird. Das Ursprungskonzept, das den Vorbereich der modifizierten Relation charakterisiert, entspricht dann gerade dem zu definierenden Konzept; das Zielkonzept, das den Nachbereich der Relation beschreibt, wird explizit angegeben durch die Wertrestriktion.

Die eigentliche Intention, die dieser zweiten Sicht zugrunde liegt, war vermutlich, eine Rollenhierarchie in Übereinstimmung mit der entstehenden Konzepthierarchie zu erhalten (s. [BS85]), wobei eine Rolle zunächst als Relation zwischen zwei Konzepten definiert wird und bei Subkonzepten diese Rolle unter Umständen eingeschränkt werden kann auf eine Teilrelation der ursprünglichen Relation, z.B. in dem der Zielbereich der Rolle auf ein Subkonzept des ursprünglichen Zielkonzeptes eingeschränkt wird. Diese Idee ist z.B. in der sogenannten *Restriktion* von Rollen (restrict-Operator) enthalten.

In vielen KL-ONE-Formalisierungen ist diese Eigenständigkeit der Rollen nicht mehr erhalten (z.B. [NvL88]). Die Krux der Sache liegt darin, daß man sich prinzipiell entscheiden muß, ob man Konzepte als zentrale Struktur ansehen will, die mittels Rollen definiert werden, oder ob man Rollen auf der Basis von Konzepten definieren (typisieren) möchte. Die meisten KL-ONE-Derivate haben sich - aufgrund der Betonung der Konzeptdefinition in KL-ONE - für ersteres entschieden. Dies zeigt sich z.B. auch an der Sprachdefinition des CLASSIC-Systems, einem von Brachman et al. entwickelten Nachfolger von KL-ONE, in dem Rollen als eigenständige Sprachkonstrukte nicht mehr existieren, sondern nur noch als atomare Bestandteile, die lediglich durch Verwendung in Konzeptdefinitionen Eingang in die Sprachspezifikation finden.

Ein größeres Gewicht auf das Konzept der Rolle bzw. Relation wird z.B. in der Repräsentationssprache KODIAK [WMA+86] gelegt.

Nach [BS85] sollen Rollen <u>funktional</u> sein, wobei der Funktionswert für ein einzelnes Individuum aus einer Menge bestehen kann: "... a given functional role of a Concept can be played by several different entities for just one individual." [BS85, S. 182]. Man kann Rollen also auch, entgegen der üblichen Handhabung, als mehrwertige Funktionen auffassen. Diese Darstellungsweise erleichtert die Definition einiger Sprachkonstrukte wie z.B. *Role Chains*, da über funktionale Rollen direkt auf die Wertemenge einer Rolle für ein Individuum zugegriffen werden kann.

Nach dem bisher gesagten können wir die Extension einer Rolle gemäß der unterschiedlichen Auffassungen verschieden definieren. Sollen Rollen primitiv sein, also beliebigen zweistelligen Relationen über dem Individuenbereich D entsprechen, ergibt sich ihre Extension durch ihre (primitive) Interpretation:

$$\varepsilon(r) := I(r) \subseteq D \times D$$

Sollen Rollen typisiert werden durch die Konzepte, zwischen denen sie entsprechende

Relationen definieren, wie dies z.B. in Feature-Logiken oder typisierten Programmiersprachen geschieht, kann man die Extension gemäß der beteiligten Konzepte einschränken:

$$\varepsilon(r) \subseteq \varepsilon(c_1) \times \varepsilon(c_2)$$

Sollen Rollen als mehrwertige Funktionen aufgefaßt werden, ergibt sich folgende Darstellung, wobei f_r die zur Relation r gehörige Funktion darstellt:

$$\varepsilon(f_r) : D \rightarrow 2^D$$

bzw. für typisierte Rollen:

$$\varepsilon(f_r) : \varepsilon(c_1) \rightarrow 2^{\varepsilon(c_2)}$$

In den gängigen KL-ONE-Derivaten wird die Wertrestriktion für Rollenfüller als Bestandteil der Konzeptdefinition behandelt, obwohl hierdurch die induzierten Subsumptionsbeziehungen zwischen Rollen nicht mehr direkt erfaßt werden können.

Ein Beispiel ist die folgende Definition des vater-Konzeptes:[4]

$$\text{vater} := (\text{AND mann (VR kind mensch)})$$

die einen 'vater' als einen 'mann' definiert, zu dem Individuen vom Typ 'mensch' in einer 'kind'-Beziehung stehen (können); so jedenfalls könnte man diese Definition natürlichsprachlich umschreiben. In der Sprache JARGON (s. [BS85]) würde die entsprechende Umschreibung lauten: "A vater is a mann with a (at least one) kind which is a mensch."[5] Gemäß späterer KL-ONE-Arbeiten, in denen eine formale Semantik der Sprachkonstrukte gegeben wird, kann die obige Definition folgendermaßen verbalisiert werden: "Ein vater ist ein mann, all dessen kind vom Typ mensch sind."

In dieser Definition werden quasi zwei Konzepte konjunktiv miteinander verknüpft, und zwar das Konzept 'mann', das ein bereits eingeführtes Konzept ist und ein Superkonzept von 'vater' darstellt, und das nicht explizit eingeführte Konzept '(VR kind mensch)', das extensional die Menge der Individuen umfaßt, deren Wert für die 'kind'-Rolle zur Extension des Konzeptes 'mensch' gehört und das man ebenfalls als Superkonzept von 'vater' auffassen kann. Störend an dieser Definition ist zum einen, daß quasi ein "Pseudo-Konzept" eingeführt wird, das nicht durch eine eigene Definition erfaßt ist und auch innerhalb des resultierenden veranschaulichenden Netzwerkes nicht auftaucht, und zum anderen, daß bezüglich der verwendeten Rolle keine explizite Information über die definierte Wertrestriktion - oder Typisierung - der Rolle vorliegt.

Eine bisher noch nicht im Detail erläuterte Unklarheit bezüglich des Rollenkonzeptes in KL-ONE liegt darin, ob Rollen als partielle oder vollständige Funktionen aufgefaßt werden sollen. Bezogen auf das obige Beispiel wäre die Frage: Muß ein vater ein kind haben? Ich meine: ja. Da Rollen in einer Konzeptdefinition notwendige Bedingungen darstellen sollen, muß für eine angegebene Rolle gefordert werden, daß jedes Individuum, das zu diesem Konzept

[4]Nach der Syntax-Definition in [BGL85] würde das Konstrukt folgendermaßen aussehen: (VRGeneric mann kind mensch) und umschrieben werden als: "Die Menge der Individuen vom Typ mann, für die gilt, daß ein Individuum nur dann in der Beziehung 'kind' zu ihnen stehen kann, wenn es vom Typ mensch ist."

[5]Auf die an dieser Stelle sichtbar werdende Unklarheit bezüglich der Notwendigkeit der Existenz von Rollenfüllern, die in KL-ONE durch sogenannte *Number Restrictions* gehandhabt wird, werden wir an späterer Stelle eingehen.

gehören soll, auch an der betreffenden Relation teilhat. In KL-ONE und seinen Derivaten wurde diese Frage zwar nicht direkt beantwortet, aber ein generellerer Weg beschritten, der zugleich diese Unklarheit beseitigt: Es wurde das zusätzliche Konstrukt der *Anzahlrestriktion* (Number Restriction, kurz: NR) eingeführt, das bezogen auf ein Konzept und eine für dieses Konzept vorhandene Rolle die mögliche Kardinalität der Rollenfüllermenge durch Angabe einer Mindest- und/oder einer Höchstanzahl restringiert; so bezeichnet (NR role min max) eine Rolle 'role', bei der auf extensionaler Ebene jedes Individuum aus dem Vorbereich mit mindestens min und höchstens max Individuen aus dem Nachbereich in der Beziehung 'role' steht.

Wir können nun die Definition des vater-Konzeptes modifizieren zu

$$\text{vater} := (\text{AND mann (VR kind mensch) (NR kind 1} \bowtie))$$

wobei $\bowtie$ ein Symbol für *'indefinit'*, d.h. eine unbestimmte natürliche Zahl, sein soll. In mehreren KL-ONE-Derivaten können Mindest- und Höchstanzahlen für die Rollenfüllermengen getrennt angegeben werden, was die Einführung eines derartigen Sonderzeichens erübrigt.

Für min und max können im allgemeinen beliebige natürliche Zahlen zugelassen werden, wobei min kleiner als oder gleich max sein muß. Eine etwas heikle Frage ist, ob 0 als Mindestwert in Anzahlrestriktionen zugelassen werden soll, wie dies in einigen KL-ONE-Derivaten geschieht und auch in [BS85] zwar nicht explizit erlaubt, aber in einem Beispiel verwendet wird. Man kann auf der einen Seite, wie bereits oben ausgeführt, die Ansicht vertreten, daß Rollen definitorischer Bestandteil von Konzepten sind und daher mindestens ein Rollenfüller für jedes Individuum existieren muß. Auf der anderen Seite kann eine Konzeptdefinition gerade die Nicht-Existenz solcher Rollenfüller fordern, z.B. in der Definition

$$\text{alte-jungfer} := (\text{AND frau (NR ehemann 0 0)})$$

die sicher eine notwendige, wenn auch nicht hinreichende Bedingung für das Konzept 'alte-jungfer' darstellt. Für solche Negativ-Definitionen ist die Einführung der 0 als Minimal- <u>und</u> Maximalwert notwendig; wir erhalten hierdurch quasi "durch die Hintertür" einen Negationsoperator. Eine Verwendung als Mindestwert in beliebigen Anzahlrestriktionen erscheint jedoch aus dem oben genannten Grund des Notwendigkeitspostulats für Rollen nicht angebracht. Adäquat wäre es hingegen, Rollen explizit als optional zu markieren, wenn sie in der Beschreibung eines Konzeptes erscheinen sollen, aber nicht notwendig erfüllt sein müssen. Dies führt zu einer Trennung zwischen *optionalen* und *obligatorischen Rollen*, die z.B. in dem KL-ONE-Derivat SB-ONE zur Verfügung gestellt wird. Außerdem kann es natürlich auch Rollen geben, die zwar notwendigerweise erfüllt sein müssen, aber nicht unbedingt zur Definition des Konzeptes beitragen; z.B. die Farbe eines reflektierenden Objektes, die zwar für jedes derartige Objekt angebbar ist, aber nur in einem bestimmten Kontext, z.B. bei einer Wissensbasis für Materialwissenschaftler oder Physiker, unter Umständen eine definitorische Funktion erfüllt.

Diese Überlegungen deuten darauf hin, daß bezüglich des epistemologischen Gehaltes von Rollen noch einige Differenzierungen erfolgen könnten.

Zunächst muß zwischen *Attributen* <u>einer</u> Entität und *Relationen* <u>zwischen</u> Entitäten unterschieden werden, wobei auch noch zu klären ist, ob man sich mit zweistelligen Relationen begnügen kann und möchte, oder ob mehrstellige Relationen sinnvoll bzw. notwendig sind. Außerdem könnte man als speziellen Fall noch die Relation zwischen einer Entität und ihren Bestandteilen hinzunehmen, die in KL-ONE in dem Konzept der *Strukturellen Beschreibung* (Structural Description, kurz: SD) reflektiert ist.

Die Unterscheidung zwischen Attributen und Relationen sollte jedoch unbedingt durchgeführt werden, da es sich hierbei um zwei vollkommen verschiedene epistemologische Kategorien handelt, auch wenn diese Trennung auf formaler Ebene zunächst nicht notwendig ist, sondern beide Kategorien auf der Basis von Relationen dargestellt werden können. In dem KL-ONE-Derivat BACK wurde ebenfalls eine solche Trennung durchgeführt, wobei als Argument außerdem angegeben wird, daß die Wertemengen solcher Attribute nicht unbedingt als eigeständige Konzepte definiert sein sollten, sondern vorgegebene, endliche Menge sein sollen, die explizit im System abgelegt sind. Im KRIS-System findet ebenfalls eine Trennung von Rollen und Attributen statt [BH90]. Dies führt natürlich zu dem Problem, daß man nun in Grenzfällen, die insbesondere bei Abstrakta auftreten, entscheiden muß, ob eine Eigenschaft einer Entität relational oder attributiv - oder beides - sein soll. Zum Beispiel kann das 'Vatersein' als ein Merkmal aufgefaßt werden oder als eine Relation zwischen einem Mann und einem Kind.

3.2 Die A-Box

Bisher wurde ausführlich der terminologische Teil von KL-ONE und seinen Derivaten diskutiert. Außer dieser sogenannten *T-Box* zeichnen sich diese Wissensrepräsentationssysteme aber auch durch einen assertionalen Anteil aus, die *A-Box*. In der A-Box stehen Aussagen über die aktuelle Welt, die allerdings die Definitionen der T-Box widerspiegeln. So können hier Aussagen über die Existenz eines einzelnen Individuums gemacht werden. Es kann zum Beispiel ein Individuum namens *Peter* eingeführt werden, über das dann ausgesagt wird, daß es ein 'vater' ist. Aus den Definitionen der T-Box kann nun abgeleitet werden, daß Peter mindestens ein 'kind' hat. Dieser Prozeß der Abbildung assertional eingeführter Individuen auf definitorische Aussagen in der T-Box wird auch als *Realisierung* bezeichnet.

3.3 Weitere Probleme mit KL-ONE und seinen Derivaten

Problematisch in KL-ONE ist nach dem bisherigen Stand der Forschung die Darstellung dynamischer Entitäten, wie Aktionen und Ereignisse. Allerdings gibt es hierzu auch einige Lösungsansätze (z.B. [Kem88] [Pro92]), die auf einer Einbeziehung logischer Formeln, die Vor- und Nachbedingungen der Aktion bzw. des Ereignisses angeben, basieren. Auch in BACK wurden mittlerweile zeitliche Operatoren in der T-Box und der A-Box eingebaut [Fis92], [Neu93].

Außerdem sind einige Operatoren in KL-ONE kritisch, da sie schwer zu berechnen sind. Daher sind die meisten Inferenzverfahren in KL-ONE und seinen Derivaten nicht vollständig. Hierzu zählt insbesondere der *Classifier*, der ein neu definiertes Konzept in die bereits vorhandene Konzepthierarchie einfügt. An dieser Stelle ist das System KRIS zu erwähnen, das nur über vollständige Inferenzverfahren verfügt [BH90].

Ebenfalls problematisch ist die Darstellung unsicheren Wissens in taxonomischen Wissensbasen. Allerdings gibt es auch hierzu bereits Lösungsansätze.[6] Ein Sonderfall hiervon ist Default-Wissen, das z.B. in LOOM durch eine eigene Box dargestellt werden kann. Auf die Darstellung von prototypischem Wissen insbesondere im Hinblick auf die Darstellung von Konzepten für Systeme der maschinellen Übersetzung geht [Sch90] ein.

[6] Für einen Überblick siehe [Kem91] und s. [Hei93].

4 KL-ONE-Derivate: Syntax- und Semantikdefinitionen

Wir bezeichnen im folgenden generell die Menge der Konzepte mit C und die Menge der Rollen mit R. Einzelne Konzepte und Rollen werden als c bzw. r mit Indizes angegeben.

Der Individuenbereich ist eine beliebige Menge D.

4.1 *FL*

Brachman und Levesque definieren in [BL84] eine *'Frame Language'* FL, die eine Teilmenge von KL-ONE darstellt.

4.1.1 Syntax

$< concept >::= \quad < atom > \mid$
$\quad (AND < concept_1 > ... < concept_n >) \mid$
$\quad (ALL < role > < concept >) \mid$
$\quad (SOME < role >)$

$< role >::= \quad < atom > \mid$
$\quad (RESTRICT < role > < concept >) \mid$

Wir bezeichnen die Menge der Konzepte mit C und die Menge der Rollen mit R. Einzelne Konzepte und Rollen werden als c bzw. r mit Index angegeben.

4.1.2 Semantik

Sei D eine Menge und ε eine Funktion, die Konzepte auf Teilmengen von D abbildet und Rollen auf Teilmengen von $D \times D$, also

$$\varepsilon[c] \subseteq D$$
$$\varepsilon[r] \subseteq D \times D$$

ε ist eine *Extensionsfunktion* über D, wenn sie folgende Bedingungen erfüllt:

- $\varepsilon[(AND < concept_1 > ... < concept_n >)] = \bigcap_{i=1}^{n} \varepsilon[c_i]$

- $\varepsilon[(ALL < role > < concept >)] = \{x \in D \mid (x, y) \in \varepsilon[r] \Rightarrow y \in \varepsilon[c]\}$

- $\varepsilon[(SOME < role >) = \{x \in D \mid \exists y : (x, y) \in \varepsilon[r]\}$

- $\varepsilon(RESTRICT < role > < concept >)\{(x, y) \in D \times D \mid (x, y) \in \varepsilon[r] \wedge y \in \varepsilon[c]\}$

4.1.3 Subsumption

Ein Konzept c *subsumiert* ein Konzept c', genau dann wenn für jede Menge D und jede Extensionsfunktion ε über D gilt: $\varepsilon[c'] \subseteq e[c]$.

Brachman und Schmolze haben gezeigt, daß die Bestimmung der Subsumptionsrelation in FL ein NP-vollständiges Problem ist. Für die eingeschränkte Sprache FL^-, die sich aus FL ohne den $RESTRICT$-Operator konstituiert, geben sie einen Algorithmus an, der die Subsumptionsbeziehung zwischen zwei Konzepten mit dem Zeitbedarf $O(n^2)$ entscheidet.

4.2 KRYPTON

Brachman et al. beschreiben in [BGL85] das Repräsentationssystem KRYPTON, das bezüglich der terminologischen Komponente eine stark reduzierte Form von KL-ONE darstellt, aber zusätzlich mit einer assertionalen Komponente ausgestattet ist. [7] In der assertionalen Komponente werden Formeln der Prädikatenlogik erster Stufe (ohne Terme) zugelassen; das automatische Beweisen dieser Formeln erfolgt auf der Basis der Konnektionsgraphmethode nach Kowalski. Wir wollen an dieser Stelle jedoch nur den terminologischen Teil der Sprache behandeln.

4.2.1 Syntax

$$\begin{aligned}
&< concept >::= \;\; < primitive - concept > \;| \\
&\qquad (ConGeneric < concept >_1 \ldots < concept >_n), \;\; n \geq 0 \;\; | \\
&\qquad (VRGeneric < concept > < role > < concept >) \;\; |
\end{aligned}$$

$$< primitive - concept >::= \;\; < 1 - place - predicate - symbol > \;|$$

$$\begin{aligned}
&< role >::= \;\; < primitive - role > \;| \\
&\qquad (RoleChain < role >_1 \ldots < role >_n), \;\; n \geq 1 \;\; |
\end{aligned}$$

$$< primitive - role >::= \;\; < 2 - place - predicate - symbol > \;|$$

4.2.2 Symboltabelle

Um eine Kopplung der terminologischen an die assertionale Komponente zu bewerkstelligen, führen Brachman et al. außerdem eine *Symboltabelle* S ein, in der Bezeichner (*gsymbols, TBox-symbols*) sowohl für primitive als auch definierte Konzepte und Rollen (*gterms*) aufgeführt sind.[8] S ist also eine Funktion, die die Bezeichner der Konzepte bzw. Rollen der terminologischen Komponente - bzw. den 1- und 2-stelligen Prädikaten der assertionalen Konponente - entweder auf sich selbst abbilden im Fall primitiver Konzepte und Rollen, oder anderenfalls auf die entsprechende Definition.

Wir müssen also die obige Grammatik noch erweitern:

$$< gterm >::=< concept > | < role >$$

[7] In [BFL83a] und [BFL83b] werden erweiterte Formen von KRYPTON angegeben, jedoch ohne eine formale Definition der Semantik.

[8] Brachman et al. lassen auch mehrstellige Prädikate in der assertionalen Sprache zu, was wir der Einfachheit halber an dieser Stelle außer acht lassen.

Für jeden gterm t gibt es nun in der Symboltabelle ein zugeordnetes Symbol s, so daß $S(s) = t$, und vice versa.[9]

4.2.3 Semantik

Sei D eine Menge und ε eine Funktion, die primitive Konzepte auf Teilmengen von D abbildet und primitive Rollen auf Teilmengen von $D \times D$.

Die *Extension* eines *gterms* t bzgl. ε ist folgendermaßen definiert:

- $\varepsilon[c]$, falls t primitiv
- $\bigcap_{i=1}^{n} \varepsilon[c_i]$, falls $t = (ConGeneric\ t_1 ... t_n)$ und $n > 0$
- D, falls $t = (ConGeneric\ t_1 ... t_n)$ und $n = 0$
- $\{d \in \varepsilon[t_1] \mid (d, d') \in \varepsilon[t_2] \Rightarrow d' \in \varepsilon[t_3]\}$, falls $t = (VRGeneric\ t_1\ t_2\ t_3)$
- $\{(d, d') \in D \times D | \exists d_1, ..., d_{n+1} \in D \forall i \in \{1, ..., n\} : (d_i, d_{i+1}) \in \varepsilon[t_i] \wedge (d_1, d_{n+1}) = (d, d')\}$, falls $t = (RoleChain\ t_1 ... t_n)$

ε ist eine *Extensionsfunktion bzgl.* S, wenn für jedes Symbol s in der Symboltabelle mit $S(s) = t$ gilt: $\varepsilon[s] = \varepsilon[t]$. Das heißt, die Extensionsfunktion muß die Definitionen der Konzepte und Rollen berücksichtigen. Das bedeutet aber auch, daß die Extensionsfunktion erweitert werden muß auf die Symbole, die Bezeichner definierter Konzepte sind. Dieser nicht unkritische Punkt wird in [BGL85] allerdings nicht angesprochen. [10]

Eine Anbindung der assertionalen Komponente an die terminologische erfolgt nun dadurch, daß die Interpretation von Formeln der assertionalen Komponente, in denen Prädikatnamen der Symboltabelle vorkommen, durch die Extensionsfunktion eingeschränkt ist.

4.3 KL-TWO

In [Vil85b] wird das System KL-TWO vorgestellt, daß bezüglich der terminologischen Komponente, genannt NIKL, ähnlich zu KL-ONE ist, aber eine zusätzliche assertionale Komponente wie KRYPTON beinhaltet, das PENNI-System. Eine genaue Syntax wird für das System nicht angegeben, aber eine formale Semantik der einzelnen Sprachkonstrukte in Lambda-Notation ist verfügbar:

NIKL Expression, x	semantics of x, $[x]$
$(Cmeet\ C_1\ C_2)$	$\lambda x.([C_1]x) \wedge ([C_2]x)$
$(Cmin\ R\ n)$	$\lambda x.\exists\ n\ distict\ y_i\ \wedge \forall i([R]x, y_i)$
$(Crestrict\ R\ C)$	$\lambda x.\forall y([R]x, y) \rightarrow ([C]y)$
$(VRdiff\ R\ C)$	$\lambda x, y.([R]x, y) \wedge ([C]y)$

[9] Brachman et al. ist ein kleiner notationeller Fehler unterlaufen, nämlich eine Doppelverwendung des Begriffs *gsymbol* für Bezeichner von primitiven Rollen und Konzepte zum einen, und für beliebige Rollen und Konzepte, also insbesondere auch definierte, zum anderen.

[10] Es muß darauf hingewiesen werden, daß in [BGL85] bezüglich der Notation und Formalisierung dieser Idee der Zuordnung von Namen zu Konzepten an einigen Stellen Unklarheiten und vermutlich auch Fehler existieren, die ich in der obigen Darstellung zu beheben versucht habe.

Die Benennung von Termen erfolgt durch ein *Let*-Statement, z.B.

$$Let\ FATHER\ (Cmeet\ PARENT\ MAN)$$

Die *Subsumption* zweier Konzepte ist folgendermaßen definiert: Konzept C_1 subsumiert Konzept C_2 genau dann wenn gilt

$$\models \forall x(C_2\ x) \rightarrow (C_1\ x)$$

In [SL83] wird ein Klassifikationsalgorithmus für KL-ONE angegeben, der auch von Vilain in KL-TWO verwendet wird (s. [Vil85a]). Neuere Entwicklungen der Repräsentationssprache NIKL können [KBR86] und dem NIKL-Handbuch [Rob86] entnommen werden.

4.4 LOOM

Das LOOM-System von MacGregor [MB87] betont mehr den Aspekt der Rolle, als dies bei den bisherigen Systemen der Fall war. Es werden spezielle Termkonstruktoren für Rollen eingeführt, wobei Rollen mit Relationen gleichgesetzt werden. Die Semantik der einzelnen Sprachkonstrukte sieht wie folgt aus:

LOOM Expression, e	semantics of e, $[e]$
$(defc\ (: specializes\ C_1\ C_2))$	$\lambda x.[C_1](x) \wedge [C_2](x)$
$(defc\ (: restriction\ R\ (vr\ C)))$	$\lambda x.\forall y([R](x,y) \rightarrow [C](y))$
$(defc\ (: restriction\ R\ (min\ n)))$	$\lambda x.\exists n\ distinct\ y_i \wedge \forall i : [R](x, y_i)$
$(defc\ (: restriction\ R\ (max\ n)))$	$\lambda x.\exists n+1\ distinct\ y_i \wedge \forall i : [R](x, y_i)$
$(defc\ (: constraint\ R(R_1\ R_2)(S_1\ S_2))$	$\lambda x.\forall y, z([R_1] \circ [R_2](x,y) \wedge [S_1] \circ [S_2](x,z)) \rightarrow [R](y,z))$
$(defc\ (: constraint\ R(R_1\ R_2)v))$	$\lambda x.\forall y, z([R_1] \circ [R_2](x,y) \rightarrow [R](y,v))$
$(defr\ (: specializes\ R_1\ R_2))$	$\lambda x, y.[R_1](x,y) \wedge [R_2](x,y)$
$(defr\ (: range\ C))$	$\lambda x, y.[C](y)$
$(defr\ (: inverse-of\ R))$	$\lambda x, y.[R](y,x)$
$(defr\ (: closure-of\ R))$	$\lambda x, y.[R]^+(y,x)$
$(defr\ (: composition-of\ R_1\ R_2))$	$\lambda x, y.[R_1] \circ [R_2](x,y)$

LOOM ist außer mit der klassischen T-Box für terminologische Definitionen noch mit einer U-Box für universal quantifizierte Ausdrücke und einer D-Box für Default-Wissen ausgestattet. Näheres zur Syntax und Handhabung der LOOM-Sprache kann auch dem LOOM User Manual [MB88] entnommen werden.

4.5 BACK

In Back wird eine Semantik-Definition der Sprachkonstrukte über sogenannte *REFOs (referential objects)* gegeben. Wenn a ein REFO ist, i und j Integer-Werte sind, D die Menge aller möglichen REFOs, die die Value Restriction befriedigen ist und $P(D)$ die Potenzmenge von D ist, dann ist $AS(A)$, die Menge aller möglichen Alternativen determiniert durch A, definiert als:

$$AS(a) := \{m \in P(D) | a \in m\}$$

$$AS(card(i,j)) := \{m \in P(D) | i \leq |m| \leq j\}$$

$AS(A\ and\ B) := AS(A) \cap AS(B)$

$AS(A\ or\ B) := AS(A) \cup AS(B)$

$AS(A\ xor\ B) := AS(A) - AS(A) \cup AS(B) - AS(A)$

$AS(not\ A) := P(D) - AS(A)$

$AS(cwa\ A) := AS(A) \cap P(K(A))$

wobei $K(A)$ als die Menge der REFOs definiert ist, die in A vorkommen:

$K(a) := \{a\}$

$K(card(i,j)) := \{\}$

$K(A\ and\ B) := K(A) \cup K(B)$

$K(A\ or\ B) := K(A) \cup K(B)$

$K(A\ xor\ B) := K(A) \cup K(B)$

$K(not\ A) := K(A)$

$K(cwa\ A) := K(A)$

Eine genauere Syntax- und Semantikdefinition der BACK-Sprache kann in [vLNPS87] oder im Anhang von [HKQ+93] gefunden werden. Die Syntax der Sprache ist in BNF-Notation folgendermaßen beschrieben:

TBoxExpr	::= TBoxRestriction|TBoxDefinition
TBoxDefinition	::= Name=TBoxTerm
Name	::= PrologAtom
TBoxTerm	::= Aset|Concept|Role
Aset	::= *attrset* (AttributeList)|Name
AttributeList	::= Attribute|Attribute,AttributeList
Attribute	::= PrologAtom
Concept	::= DefConcept|PrimConcept
PrimConcept	::= $rootconcept_i$|
	$primconcept_j$(CSpecList)|Name
DefConcept	::= $defconcept_j$(CSpecList)|Name
CSpecList	::= CSpec|CSpec,CspecList
CSpec	::= *specializes* (Concept)|
	value-restriction (Role,ConceptOrAset)|
	nrmin-restriction (Role,Number)|
	nrmax-restriction (Role,Number)|
	rvm (RvmOp,[Role],[Role])|
RvmOp	::= =
ConceptOrAset	::= Concept|Aset
Number	::= *0*|PositiveInteger|*in*
Role	::= $primrole_k$ (RSpecList)|Name
RSpecList	::= RSpec|Rspec,RSpeclist

RSpec	::= *differentiates* (Role)|
	domain-range (Concept,ConceptOrAset)
TBoxRestriction	::= DisjointnessRestriction|
	IndividualRestriction
DisjointnessRestriction	::= *disjoint* (PrimConceptList)
PrimConceptList	::= PrimConcept|
	PrimConcept,PrimConceptList
IndividualRestriction	*individual* (PrimConcept)

Von Luck et al. gehen davon aus, daß drei Mengen von Prädikaten als Primitiva über der Domäne D definiert sind, nämlich die wechselseitig verschiedenen *root predicates* RP_i, die einstelligen *primitiven Prädikate* PP_j und die zweistelligen *Rollenprädikate* R_k. Die Definition der Semantik der oben eingeführten Sprachkonstrukte ist dann definiert durch eine Funktion F, die T-Box-Terme abbildet auf Teilmengen aus D bzw. $D \times D$:

$$F[attrset(a_1, \ldots, a_n)] = \lambda x.x = a_1 \vee \ldots \vee x = a_n$$

$$F[rootconcept_i] = \lambda x.RP_i(x)$$

$$F[primconcept_j(CC)] = \lambda x.PP_j(x) \wedge f[CC](x)$$

$$F[defconcept(CC)] = \lambda x.f[CC](x)$$

$$F[primerole_k(RC)] = \lambda x, y.R_k(x, y) \wedge f[RC](x, y)$$

wobei die Funktion f eine folgendermaßen definierte Abbildung von Konzept- und Rollenspezifikationen auf Prädikate ist:

$$f[C_1, \ldots, C_n] = \lambda x.f[C_1](x) \wedge \ldots \wedge f[C_n](x)$$

$$f[specializes(C)] = \lambda x.f[C](x)$$

$$f[value - restriction(R, C)] = \lambda x.\forall y : f[R](x, y) \rightarrow f[C](y)$$

$$f[nrmin - restriction(R, n)] = \lambda x.\exists_n y : f[R](x, y)$$

$$f[nrmax - restriction(R, n)] = \lambda x.\ \nexists_{n+1} y : f[R](x, y)$$

$$f[rvm(=, [R_1], [R_2])] = \lambda x.\forall y : f[R_1](x, y) \leftrightarrow F[R_2](x, y)$$

$$f[R_1, \ldots, R_n] = \lambda x, y.f[R_1](x, y) \wedge \ldots \wedge f[R_n](x, y)$$

$$f[differentiates(R)] = \lambda x, y.f[R](x, y)$$

$$f[domain - range(C_1, C_2)] = \lambda x, y.f[C_1](x) \wedge F[C_2](y)$$

Außerdem werden noch Axiome für die Disjointness- und die Individualrestriktion angegeben.

Im Rahmen der BACK-Forschung beschäftigte sich Bernhard Nebel insbesondere mit Revisionsalgorithmen und circulären Definitionen in KL-ONE-Sprachen [Neb90].

In einer neueren Version [HKQ+93] wurde die Sprache auch um nicht-definitorische Informationen erweitert, die durch Regeln dargestellt wird.

4.6 QUIRK

QUIRK (*Quick Reimplementation of KL-ONE*) ist ein Repräsentationsformalismus aus der Familie der KL-ONE-Sprachen und zugleich ein Softwarewerkzeug zur Erstellung von Wissensbasen (s. [BG86]). QUIRK umfaßt Algorithmen zur Vererbung, Subsumption und Klassifikation.

4.6.1 Syntax

ConceptDefinition = (DEFCONCEPT ConceptName ConceptForm*)
ConceptForm = SpecializationConcept | RestrictionConcept | Primitivespec | RoleConstraint | Comment
SpecializationConcept = (S|SPECIALIZES ConceptName*)
RestrictionConcept = (RESTRICTION|ROLE|RES Rolename RestrictionForm*)
RestrictionForm = VRRForm | NumberRForm | MaxRForm | MinRForm | RoleForm
VRRForm = (VR|VRCONCEPT ConceptName)
NumberRForm = (NUMBER number)
MaxRForm = (MAX number)
MinRForm = (MIN number)
PrimitiveSpec = P|PRIMITIVE|(P)|(PRIMITIVE)
RoleConstraint (RoleConstraintType RoleChain RoleChain)
RoleConstraintType = | > | <
RoleChain = SELF | RoleName*
Comment = (* anyLispForm*)
RoleDefinition = (DEFROLE RoleName RoleForm*)
RoleForm = DifferentiatesRole | PrimDiffRole | VRDiffRole | DomainRole | RangeRole | PrimitiveSpec | InverseRole | Comment
DifferentiatesRole = (DIFFS|DIFFERENTIATES RoleName*)
PrimDiffRole = (PRIMDIFF RoleName*)
VRDiffRole = (VRDIFF RoleName ConceptName)
DomainRole = (DOMAIN ConceptName)
RangeRole = (RANGE ConceptName)
InverseRole = (INVERSE RoleName)

Die für die Benutzereingaben in der oben angegebenen Form definierte Syntax wird einem Normalisierungsprozeß unterzogen, bei dem Schlüsselwortalternativen entfallen (nur noch SPECIALIZES, ROLE, VR, (PRIMITIVE), DIFFERENTIATES und PRIMDIFF durch PRIMITIVE und DIFFERENTIATES sowie VRDIFF durch RANGE und DIFFERENTIATES ausgedrückt wird.

4.6.2 Semantik

In der folgenden Semantik-Definition ist C_0 das definierte Konzept, R_0 die defnierte Rolle und RR_0 die Rolle in einem definierten RestrictionConcept.

(SPECIALIZES $C_1 \ldots C_n$) $\quad C_0(x) \Rightarrow (C_1(x) \wedge \ldots \wedge C_n(x))$
(VR C_1) $\quad C_0(x) \Rightarrow (RR_0(x,y) \Rightarrow C_1(y)$
(MIN n) $\quad C_0(x) \Rightarrow \exists_n y : RR_0(x,y)$

(MAX n)	$C_0(x) \Rightarrow \nexists_{n+1} y : RR_0(x,y)$
(NUMBER n)	$\Leftrightarrow$ (MIN n) $\wedge$ (MAX n)
(PRIMITIVE)	C_0 bzw. R_0 ist primitives Prädikat
$(> (R_1 \ldots R_n)(S_1 \ldots S_n))$	$C_0(x) \Rightarrow (R_1(x,y) \wedge R_2(y_1,y_2) \wedge \ldots \wedge R_n(y_{n-1},y_n) \Rightarrow$ $\exists z_1 \ldots z_{m-1} : S_1(x,z_1) \wedge S_2(z_1,z_2) \wedge \ldots \wedge S_m(z_{m-1},y_n)$
$(< (R_1 \ldots R_n)(S_1 \ldots S_n))$	$\Leftrightarrow (> (S_1 \ldots S_n)(R_1 \ldots R_n))$
$(= (R_1 \ldots R_n)(S_1 \ldots S_n))$	$\Leftrightarrow (> (S_1 \ldots S_n)(R_1 \ldots R_n)) \wedge (< (S_1 \ldots S_n)(R_1 \ldots R_n))$
(SELF $(R_1 \ldots R_n)$)	$C_0(x) \Rightarrow (R_1(x,y_1) \wedge R_2(y_1,y_2) \wedge \ldots \wedge R_n(y_{n-1},y_n) \rightarrow y_n = x)$
($(R_1 \ldots R_n)$ SELF)	$C_0(x) \Rightarrow \exists y_1 \ldots y_{n-1} : (R_1(x,y_1) \wedge R_2(y_1,y_2) \wedge \ldots \wedge R_n(y_{n-1},x)$
(DIFFERENTIATES $R_1 \ldots R_n$)	$R_0(x,y) \Rightarrow (R_1(x,y) \wedge \ldots \wedge R_n(x,y))$
(PRIMDIFF $R_1 \ldots R_n$)	(PRIMITIVE)$\wedge$(DIFERENTIATES $R_1 \ldots R_n$)
(VRDIFF R_1 C_1)	(RANGE C_1)$\wedge$(DIFERENTIATES R_1)
(DOMAIN C_1)	$R_0(x,y) \Rightarrow C_1(x)$
(RANGE C_1)	$R_0(x,y) \Rightarrow C_1(y)$
(INVERSE R_1)	$R_0(x,y) \Rightarrow R_1(y,x)$

4.7 SB-ONE

SB-ONE wurde innerhalb des Projektes XTRA des SFB 314 an der Universität des Saarlandes entwickelt [Kob89]. Außer den üblichen Konstrukten erfaßt eine Erweiterung von SB-ONE auch mengenwertige Rollen insbesondere zur Darstellung pluraler Nominalphrasen. Die folgenden Syntax- und Semantikdefinitionen wurden [AR90] entnommen.

4.7.1 Syntax

TELL structure:

TBoxExpression ::=	TBoxDefinition | TBoxRestriction | TBoxExtension | TBoxRelaxation
TBoxDefinition ::=	Concept | Role

Concept definition

DomainConcept ::=	Concept
RangeConcept ::=	Concept
DefaultVRConcept ::=	Concept
Concept ::=	PrimConcept | DefConcept | SingConcept
PrimConcept ::=	**primconcept**(CName, CSpecList) | Name
DefConcept ::=	**defconcept**(CName, CSpecList) | Name
SingConcept ::=	**singleton**(CName, CSpecList) | Name
ConceptList ::=	Concept | Concept, ConceptList

CSpecList ::=	**supers**(ConceptList) |
	CSpec |
	CSpec, CSpecList
CSpec ::=	RoleInhRes | CSpec1
CSpec1 ::=	**nr**(RName, NRTriple) |
	cr(RName, CRSpec) |
	necres(RName, NecSpec)
CSpec2 ::=	RoleRaiseRes | CSpec1
RoleRaiseRes ::=	**raise-inh**(RName, RoleRes, RoleRange)
RoleInhRes ::=	**restrict-inh**(RName, RoleRes, RoleRange)
RoleRange ::=	**range**(RangeConcept, DefaultVRConcept)
NRTriple ::=	(MinNR, MaxNR, DefNR)
CRSpec ::=	**C** | **S** | **E**
NecSpec ::=	**opt** | **nec**
MinNR ::=	**0** | PosInteger
MaxNR ::=	PosInteger | **inf**
DefNR ::=	PosInteger
Number ::=	**0** | PosInteger | **inf**

Role definition

Role ::=	PrimRole |
	DefRole |
	vrdiff(Role, DSpecList) |
	Name
PrimRole ::=	**primelemrole**(PrimElemRoleName, PrimRoleSpec) |
	primsetrole(PrimSetRoleName, PrimRoleSpec)
PrimRoleSpec ::=	**domain-range**(DomainConcept, RangeConcept, DefaultVRConcept)
DefRole ::=	**defelemrole**(ElemRoleName, DefRoleSpec) |
	defsetrole(SetRoleName, DefRoleSpec)
DefRoleSpec ::=	RoleRes, RoleDomain
RoleRes ::=	**restricts**(Role)
DSpecList ::=	DSpec, DSpec | DSpec, DSpeclist
DSpec ::=	(DRoleName, NRTriple, RangeConcept DefaultVRConcept)

Attribute definitions

TBoxRestriction ::=	DisjointnessRestriction | AttributeRestriction
DisjointnessRestriction ::=	**disjoint**(PrimConceptList)
PrimConceptList ::=	PrimConcept | PrimConcept, PrimConceptList
AttributeRestriction ::=	**attributes**(Concept, AttributeList)
AttributeList ::=	AttributeElement | AttributeList
AttributeElement ::=	(AttributeName AttributeValue)

Concept expansion

TBoxExtension ::=	**expand**(CName, CSpecList)

Relaxation of roles and concepts

TBoxRelaxation ::=	RoleRelax | ConceptRelax
RoleRelax ::=	**relaxrole**(RName, RoleRange)
ConceptRelax ::=	**relaxconcept**(CName, CSpecList1)
CSpecList1 ::=	CSpec2 | CSpec2, CSpecList1

Individualization

ABoxExpression ::=	ABoxIndividualization
ABoxIndividualization ::=	IConcept | IRole

Concept Individualization

IConcept ::=	**definst**(CName, ICSpecList) | Name
ICSpecList ::=	ICSpecList1, ICSpecList2
ICSpecList1 ::=	**isa**(CName), **card**(CardSpec)
ICSpecList2 ::=	ICSpec2 | ICSpec2, ICSpecList2
ICSpec2 ::=	**irole**(RName, IRSpecList2)
CardSpec ::=	PosInteger | (MinNR, MaxNR)

Role Individualization

IRole ::=	**defirole** (RName, IRSpecList)
IRSpecList ::=	IRSpecList1, IRSpecList2
IRSpecList1 ::=	**at**(CName)
IRSpecList2 ::=	IRSpec2, IRSpec3 |
	IRSpec1, IRSpec2, IRSpec3
IRSpec1 ::=	**name**(IRole)
IRSpec2 ::=	**nr**(NRTriple)
IRSpec3 ::=	**vr**(IConcept)

4.7.2 Semantik

Znächst wird eine Struktur S = $<$D, M_p $>$ vorgegeben, wobei

die Domäne D = $D_S \cup \mathcal{P}(D_S)$, wobei D_S die Standarddomäne ist und

M_P : Primitives $\mapsto$ D $\cup$ (D $\times$ D) vorgegeben ist.

Als nächstes wird die Interpretation M_P erweitert auf M:

M : terms $\mapsto$ D $\cup$ (D $\times$ D)

$\preceq$ steht für die Subsumptionsrelation, i.e. $C_1 \preceq C_2 \iff$ **supers**(C_1,C_2).
Die Semantik für den TBox-Teil von SB-ONE sieht folgendermaßen aus:

M[**supers**(C)] = M[C]

$M[C_1, \ldots , C_n] = \bigcap_i M[C_i]$

M[**primconcept**(C_1, **supers**(C_2))] = PS $\cap$ M[C_2]

$M[\mathbf{defconcept}(C_1,\ \mathbf{supers}(C_2))] = M[C_2]$

$M[\mathbf{singleton}(C_1,\ \mathbf{supers}(C_2))] \Longleftrightarrow M[C_1] = M[C_2] \wedge \mathrm{card}(M[C_1]) = 1 \wedge M[C_1] \in D$

$$M[\mathbf{nr}(\mathrm{SetRole},\ (i,\ j,\ k))] = \\ \{x \in \mathcal{P}(D) \mid i \leq \textstyle\sum_l \mathrm{card}(e_l) \leq j, \text{ with } e_l \in \{y \in D \times \mathcal{P}(D) \mid (x,y) \in M[\mathrm{SetRole}]\} \\ \wedge \\ y \in D \vee y \in \mathcal{P}(D)\}$$

$$M[\mathbf{nr}(\mathrm{ElemRole},\ (i,\ j,\ k))] = \\ \{x \in D \mid i \leq \textstyle\sum_l \mathrm{card}(e_l) \leq j, \text{ with } e_l \in \{y \in D \times 2^D \mid (x,y) \in M[\mathrm{ElemRole}]\} \\ \wedge \\ y \in D \vee y \in \mathcal{P}(D)\}$$

$M[\mathbf{cr}(\mathrm{Role},\ \mathbf{C})] = M[\mathrm{Role}]$

$M[\mathbf{cr}(\mathrm{Role},\ \mathbf{S})] = M[\mathrm{Role}] \cup (D \times \mathcal{P}(D_S))$

$M[\mathbf{cr}(\mathrm{Role},\ \mathbf{E})] = M[\mathrm{Role}] \cup (D \times D_S)$

$$M[\mathbf{primelemrole}(R,\ \mathbf{domain\text{-}range}(C_1,\ C_2,\ C_3))]: \\ R \subseteq (C_1 \cup D) \times C_2 \\ \wedge \\ C_3 \preceq C_2\ \}$$

$$M[\mathbf{primsetrole}(R,\ \mathbf{domain\text{-}range}(C_1,\ C_2,\ C_3))]: \\ R \subseteq (C_1 \cup \mathcal{P}(D)) \times C_2 \\ \wedge \\ C_3 \preceq C_2\ \}$$

$M[\mathbf{restricts}(R)] = M[R]$

$$M[\mathbf{restricts\text{-}inh}(R_1,\ \mathbf{restricts}(R_2),\ \mathbf{range}(C_1,\ C_2))] = \\ M[R_1] = M[R_2] \cap (D \cup \mathcal{P}(D)) \times C_1$$

$$M[\mathbf{raise\text{-}inh}(R_1,\ \mathbf{restricts}(R_2),\ \mathbf{range}(C_1,\ C_2))] = \\ M[R_1] = M[R_2] \cap (D \cup \mathcal{P}(D)) \times C_1$$

4.8 ALC

Die Sprache ALC und Erweiterungen hiervon wurde von Schmidt-Schauß und Smolka [SSSar] u.a. eingesetzt, um Aussagen bzgl. der Berechenbarkeit von Konzeptsprachen zu erhalten. Die Sprache selbst ist folgendermaßen definiert: Seien C, D Konzepte, A ein primitives Konzept und R eine Rolle. Dann ist die Syntax von ALC wie folgt:

$$C, D \rightarrow A \mid \forall R : C \mid \exists R : C \mid C \sqcap D \mid C \sqcup D \mid \not C$$

Die Semantik ist folgendermaßen definiert:

- $\eta[\top] = D$
- $\eta[\forall R : C] = \{x \in D \mid \forall (x, y) \in \eta[R] : y \in \eta[C]\}$
- $\eta[\exists R : C] = \{x \in D \mid \exists (x, y) \in \eta[R] : y \in \eta[C]\}$
- $\eta[C \sqcap D] = \eta[C] \cap \eta[D]$
- $\eta[C \sqcup D] = \eta[C] \cup \eta[D]$
- $\eta[\not C] = D \setminus \eta[C]$

Die Subsumption in ALC selbst ist ein PSPACE-vollständiges Problem. Hollunder und Nutt behandeln Erweiterungen von ALC, nämlich $ALCN$, eine Erweiterung um Number Restrictions, und $ALCF$, eine Erweiterung um Feature-Terme [HN90]. Sie können zeigen, daß Subsumption in $ALCN$ PSPACE-vollständig ist und in $ALCF$ entscheidbar ist.

Weitere Ergebnise bzgl. der Berechenbarkeit der Subumptionrelation können [Neb90] entnommen werden.

4.9 Weitere Sprachen

Ein weiterer direkter Nachfolger von KL-ONE ist die Sprache CLASSIC, die angelehnt ist an Anforderungen aus dem Datenbankbereich [BBMR89]. CLASSIC erlaubt partielle Beschreibungen von Individuen unter einer Open-World-Assumption und betont das Konzept der Antworten auf Anfragen in einer Datenbanksicht. CLASSIC verfügt über zusätzliche Sprachkonstrukte wie z.B. *ONE-OF*, mittels dessen Individuen aufgezählt werden können, oder Testfunktionen. CLASSIC ist integriert in eine sogenannte Host-Sprache.

Eine weitere Sprache, die als Konkurrenz zu LOOM aufgefaßt werden kann, ist die ebenfalls am USC ISI entwickelte Sprache HIFI [SS88], die ausgeht von einer Kritik am NIKL-System. HIFI legt größeren Wert auf die Ausdrucksfähigkeit der Sprache und nimmt dafür Einschränkungen bzgl. des Classifiers in Kauf. Als zusätzliche Sprachkonzepte verfügt HIFI über sogenannte *Properties, Assertions* und *Actions*. Die Beschreibung von Aktionen basiert auf einem CD-Theorie-ähnlichen Ansatz und einer Spezifikation der Resultate von Aktionen, die durch Namen von Variablen gegeben ist.

Das System KRIS enthält alle gängigen Konstruktionsoperatoren für Konzepte und Rollen, wie Konjunktion, Disjunktion, Negation, Role-Value-Maps und Number Restrictions. Im Gegensatz zu vielen anderen Systemen sind die Inferenzverfahren (Subsumption, Instantiierung, Klassifizierung und Realisierung) vollständig [BH90].

Ein Datenbank-orientierter Ansatz wurde ebenfalls bei der Entwicklung des MESON-Systems betont [EO86].

Die Sprache TermLog erlaubt zusätzliche *Interdependence Relations* zwischen primitiven Konzepten [DL88].

LOGSTER kombiniert eine relationale und eine objekt-orientierte Sicht auf terminologische Wissensbasen [BS88].

VIEKL (Vienna KL-ONE) ist ein stark an KL-ONE orientiertes Wissensrepräsentationssystem, das eine Wissensrepräsentationssprache und einen Classifier enthält.

Das OMEGA-System erlaubt die Integration von Variablen in Beschreibungen und verschiedene Viewpoints [ACDS86]. Taxonomisches Reasoning wird in OMEGA durchgeführt auf der Basis des Traversierens und Markierens der entstandenen Gitterstruktur.

Ein algebraisch-orientierter Ansatz der Darstellung von Vererbungshierarchien ist in [AK86] zu finden.

Einen Überblick über terminologische Wissensrepräsentationssprachen und deren Verwendung am DFKI gibt [HH92].

5 LILOG

Die Sprache L_{LILOG}, die im Projekt LILOG [HR91] entwickelt wurde, basiert zunächst auf einer Sortenhierarchie. Ähnlich wie in KL-ONE können neue Sorten durch Operatoren eingeführt werden. In LILOG wurden hierzu z.B. die Operatoren Durchschnitt, Vereinigung und Komplement eingeführt.

Die Subsumptionsrelation in diesen so beschriebenen Sortenverbänden wird ebenfalls über eine extensionale Interpretationsfunktion definiert.

In L_{LILOG} werden ebenfalls Rollen verwendet, deren Vor- und Nachbereich einer Sorte angehören, ähnlich zu den Role Value Maps in KL-ONE.

Außerdem können Aufzählungstypen verwendet werden, die durch das Schlüsselwort *atoms* eingeführt werden.

Neben den Rollen gibt es in L_{LILOG} auch Eigenschaften von Sorten, die sogenannten *features*, die auch eine Anzahlrestriktion haben können, angegeben durch ein Integerintervall.

Im Unterschied zu KL-ONE können in L_{LILOG} auch Funktionen beliebiger Stelligkeit eingeführt werden, die Argumente mehrerer Sorten auf einen Funktionswert einer Sorte abbilden. Durch nullstellige Funktionen werden auch Konstanten eingeführt.

Außer Funktionen können auch mehrstellige Prädikate definiert werden, von denen einige als vordefiniert bereits vom System zur Verfügung gestellt werden.

Auch die Definition von Axiomen ist in L_{LILOG} möglich. Hierbei werden sowohl all- als auch existenzquantifizierte Formeln zugelassen, sodaß die volle Mächtigkeit der Prädikatenlogik erster Stufe erreicht wird. Es ist auch möglich, innerhalb dieser Axiome Defaults zu verwenden, wobei unterschieden wird zwischen optimistischen und pessimistischen Defaults.

Die Inferenzmaschine von LILOG arbeitet sowohl im Vorwärts- als auch im Rückwärtsmodus, je nachdem, ob eine sprachliche Äußerung analysiert werden soll, oder eine Frage zum Text beantwortet werden soll. Die Inferenzmaschine ist in Quintus Prolog implementiert.

Eine A-BOX ist in L_{LILOG} nicht zu finden. Individuen werden eingeführt durch das Schlüsselwort *refo*.

Wie wir gesehen haben, ist L_{LILOG} im terminologischen Teil durchaus ähnlich zu KL-ONE. Unterschiede sind das Fehlen einer expliziten A-BOX und die Handhabung beliebiger Axiome der Prädikatenlogik erster Stufe.

6 Zusammenfassender Vergleich der Systeme

Bezüglich der Ausdrucksfähigkeit der weiter vorne vorgestellten Sprachen lassen sich einige Differenzen ausmachen.

So beinhaltet z.B. ALC nur die wichtigsten mengentheoretischen Operatoren für Konzepte; Rollen werden kaum berücksichtigt. Die Spracheinschränkung wurde in Kauf genommen, um auf jeden Fall bzgl. der Subsumptionsrelation in polynomialer Zeit Entscheidungen treffen zu können.

Wenig besser sieht es auch bei FL von Brachman und Levesque aus. Diese Sprache beinhaltet nur die notwendigsten Operatoren wie Konjunktion von Konzepten und Role Value Maps.

Die Sprache KRYPTON ist zwar auch nicht viel mächtiger als FL (sie hat zusätzlich noch Rollenketten), aber hier wurde ein expliziter Beweiser der Prädikatenlogik erster Stufe für die A-Box eingesetzt.

Ebenfalls über einen Beweiser in der assertionalen Komponente verfügt KL-TWO. Das System beinhaltet allerdings auch nur wenig Sprachkonstrukte wie Konjunktion von Konzepten, Role Value Maps und eine Mindestanzahlangabe für Rollenfüller.

LOOM verfügt in der Sprachdefinition außer über die bekannten Konstrukte noch über inverse Rollen, Rollenketten und den transitiven Abschluß von Rollen. Das Interessante an LOOM ist, daß es neben einer T- und einer A-Box noch über eine U-Box für allquantifizierte, nicht-definitorische Ausdrücke und eine D-Box für Default-Wissen verfügt.

BACK besitzt von den bisher vorgestellten Sprachen neben LOOM den größten Sprachumfang. Es werden Anzahlrestriktionen eingeführt, Sortenrestriktionen für den Vor- und Nachbereich von Rollen, inverse Rollen, Komposition von Rollen und transitiver Abschluß von Rollen. Außerdem werden Mengenterme mit entsprechenden einschlägigen Operatoren verwendet. Zudem bietet das System die Möglichkeit, mit Zahlen zu hantieren. Über TELL-Ausdrücke kann die Wissensbasis aufgebaut werden; ASK-Ausdrücke dienen zum Abfragen von Informationen aus der Wissensbasis, z.B. ob zwei Konzepte disjunkt sind, ob ein Konzept ein anderes subsumiert, ob zwei Konzepte äquivalent sind oder ob eine neue Konzeptdefinition mit der Wissensbasis unvereinbar ist.

Bei der Sprache SB-ONE finden sich ebenfalls die zentralen Sprachkonzepte. Es wurde hierbei die Darstellung mengenwertiger Rollen zur Behandlung pluraler Nominalphrasen besonders berücksichtigt.

Die am DFKI entwickelte Sprache KRIS beinhaltet ebenfalls die wichtigsten Sprachoperatoren wie Konjunktion, Disjunktion und Negation von Konzepten, außerdem Role Value Maps, Anzahlrestriktionen, Gleichheit und Ungleichheit von Konzeptdefinitionen und Rollenketten. KRIS beinhaltet einen Subsumptionsalgorithmus, einen Klassifizierer, der die Konzepthierarchie aufbaut, einen Instantiziierer, mittels dessen abgeleitet werden kann, ob eine Aussage von der T-Box und der A-Box impliziert wird, und einen Realizer.

L_{LILOG} vereint eine sortenrestringierte Sprache mit einem allgemeinen Beweiser der Prädikatenlogik erster Stufe. Es findet hierbei keine strenge Unterscheidung zwischen einer T-Box und einer A-Box statt. Der Beweiser kann zwar Sortenrestriktionen berücksichtigen, dürfte aber trotzdem mit den Problemen der großen Komplexität und der Nicht-Entscheidbarkeit konfrontiert sein.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß das BACK-System durch seine groß Vielfalt an Sprachkonstrukten [HKQ+93] überzeugte. Es sollten vielleicht noch Gedanken aus LOOM berücksichtigt werden, das zusätzliche Boxen für all-quantifizierte nicht-definitorische Aussagen und Default-Wissen bereitstellt.

6.1 Ein empirischer Vergleich einiger KL-ONE-Derivate

Bei einem empirischen Vergleich bzgl. der Laufzeit bei der Berechnung von Subsumptionsrelationen [JHP92] schnitt das LOOM-System im Vergleich zu den anderen getesteten Systemen am besten ab. Dann folgten CLASSIC und BACK. Für den komplexesten Testfall versagten BACK, CLASSIC, MESON und SB-ONE gänzlich. Das KRIS-System stieg bei zwei der vier Testfälle in den komplexen Tests aus. Die Testfälle sahen folgendermaßen aus:

1. $C \| D$, $E \doteq C \sqcap D$
   $\vdash \mathrm{E} \preceq \bot$
2. $C \| D$, $E \doteq \forall R{:}(C \sqcap D) \sqcap \exists R$
   $\vdash \mathrm{E} \preceq \bot$
3. $C \| D$, $E \sqsubseteq C$, $F \sqsubseteq D$
   $\vdash E \| F$
4. $C \sqsubseteq D$, $C \| D$
   $\vdash \mathrm{C} \preceq \bot$

wobei $C \| D$ bedeutet (disjoint C D).

Das Ergebnis der Tests läßt sich aus der folgenden Tabelle ablesen (das n steht für die Schachtelungstiefe der Konzepte):

The Hard Cases							
Result (sec) of Test ...		System					
		BACK	CLASSIC	KRIS	LOOM	MESON	SB-ONE
1	n=4	1	2	3	1	1	11
	n=8	1	4	77	3	2	33
	n=12	2	5	2680	5	6	56
2	n=4	7	3	82	7	3	99
	n=8	32	11	1867	22	23	859
	n=12	75	16	—†	39	84	3263
3	n=4	25	4	459	28	29	372
	n=6	352	40	18230	155	5099	1836
	n=8	6035	706	—†	666	—†	9500
4	n=4	—‡	—	4	4	—	—
	n=8	—	—	49	8	—	—
	n=12	—	—	745	13	—	—

† Test wurde abgebrochen
‡ System stürzte ab

Tabelle 1: Hard Cases: Testergebnisse

7 Einsatz von KL-ONE-Derivaten in Verbmobil

Der Einsatz der Wissensrepräsentation in Verbmobil erfolgt auf verschiedenen Ebenen.

Zunächst soll allgemeines Weltwissen repräsentiert werden. KL-ONE unterstützt diese Art von Wissensrepräsentation, soweit es sich um begriffliches Wissen handelt. Problematisch hierbei ist - wie bereits angesprochen - die Darstellung temporaler Strukturen (Ereignisse, Aktionen und deren Beziehung untereinander). Hierzu müssen neue Darstellungen für begriffliches Wissen sowie externe Inferenzverfahren (z.B. eine Zeitlogik) entwickelt werden. Gerade für Verbmobil sind solche temporalen Inferenzen essentiell.

Externe Inferenzverfahren werden ebenfalls notwendig für die Repräsentation von Modalitäten. Hierzu sind bisher keine Ansätze einer Einbindung in KL-ONE bekannt.

An dieser Stelle stellt sich die Frage der generellen Interaktion der Wissensrepräsentation mit anderen Inferenzverfahren. Aus LOOM sind bereits die verschiedenen Boxen für die Darstellung unterschiedlicher Wissensarten (z.B. Default-Wissen) bekannt. Gerade für die in Verbmobil relevanaten Darstellungen zeitlicher Zusammenhänge sind spezielle Inferenzverfahren notwendig, die in Kombination mit der Information über Individuen in der A-Box gekoppelt sein müssen.

Ebenfalls dargestellt werden soll sprachliches Wissen. Die Begriffsstrukturen von KL-ONE unterstützen die lexikalische Semantik und die Vererbungshierarchien bzw. Sortenverbände stellen gleichzeitig Frame-Beschränkungen für die semantische Auswertung dar. Interessant ist auch ein Export der Sortenverbände in die Grammatik, um die Sortenrestriktionen schon beim Parsen ausnutzen zu können.

Außerdem sollte die Darstellung eines Kontextgedächtnisses erfolgen, daß in KL-ONE durch Markierung bzw. Partitionierung der Wissensbasis erfolgen könnte.

Innerhalb der semantischen Auswertung sind noch die Anforderungen der Resolution und des Disambiguierens zu nennen. Hierfür werden vermutlich ebenfalls spezielle Inferenzverfahren notwendig, die strukturelles und dynamisches Wissen aus der T- bzw. A-Box berücksichtigen.

Als letztes wäre das Architekturproblem zu nennen. Wie läßt sich die Wissensrepräsentation sinnvoll in das Gesamtsystem integrieren? Ansätze hierzu können zum Teil aus den einschlägigen Projekten entnommen werden, die KL-ONE-Derivate entwickelt und gleichzeitig in größeren Projekten eingesetzt haben, wie z.B. SB-ONE im Projekt Xtra, dessen Ziel die Entwicklung eines natürlich-sprachlichen Hilfesystems zur Unterstützung beim Ausfüllen des Lohnsteuerjahresausgleichsformulars war. Gängige Schnittstellen zu KL-ONE-Derivaten sind die sogenannten TELL- und ASK-Funktionen, mit denen die Wissensbasis aufgebaut bzw. Information aus der Wissensbasis abgefragt werden kann. Noch zu untersuchen ist - wie bereits angesprochen - die Kopplung externer Inferenzverfahren mit der Wissensbasis, d.h. der T-Box und der A-Box. Dies dürfte m.E. jedoch nicht zu größeren Problemen führen.

Literatur

[ACDS86] G. Attardi, A. Corradini, S. Diomedi, and M. Simi. Taxonomic reasoning. In *Proceedings of the 7th European Conference on Artificial Intelligence*, pages 236–245, 1986.

[AK86] H. Ait-Kaci. An algebraic semantics approach to the effective reolution of type equations. *Theoretical Computer Science*, 45:293–351, 1986.

[AR90] J. Allgayer and C. Reddig. What KL-ONE looakalikes need to cope with natural language. In K. Bläsius, U. Hedstück, and C.-R. Rollinger, editors, *Sorts and Types in Artificial Intelligence*. Springer, 1990.

[BBMR89] A. Borgida, R. J. Brachman, D. L. McGuinness, and L. A. Resnick. Classic: A structural data model for objects. In *Proceedings of the 1989 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*, Portland, Oregon, 1989.

[BFL83a] R. J. Brachman, R. E. Fikes, and H. J. Levesque. Krypton: A functional approach to knowledge representation. *IEEE Computer*, 16(10):67–73, 1983.

[BFL83b] R. J. Brachman, R. E. Fikes, and H. J. Levesque. Krypton: Integrating terminology and assertion. In *Proceedings of the 3rd National Conference on Artificial Intelligence*, pages 31–35, 1983.

[BG86] H. Bermann and M. Gerlach. Quirk - Implementierung einer Tbox zur Repräsentation begrifflichen Wissens. Memo Nr. 11, Verbundvorhaben WISBER, Universität Hamburg, Hamburg, F.R.G., 1986.

[BGL85] R. J. Brachman, V. P. Gilbert, and H. J. Levesque. An essential hybrid reasoning system: Knowledge and symbol level accounts of krypton. In *Proceedings of the 9th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pages 532–539, 1985.

[BH90] F. Baader and B. Hollunder. KRIS: Knowledge representation and inference system. Technical Memo TM-90-03, Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz, Kaiserslautern, Germany, 1990.

[BL84] R. J. Brachman and H. J. Levesque. The tractability of subsumption in frame-based description languages. In *Proc. AAAI-84*, pages 34–37, 1984.

[Bra79] R. J. Brachman. On the epistemological status of semantic networks. In N. V. Findler, editor, *Associative Networks: Representation and Use of Knowledge by Computers*, pages 3–50. Academic Press, Orlando, 1979.

[BS85] R. J. Brachman and J. G. Schmolze. An overview of the KL-ONE knowledge representation system. *Cognitive Science*, 9(2):171–216, 1985.

[BS88] M. Balaban and S. Strack. Logster - a relational, object-oriented system for knowledge representation. In Z. W. Ras and L. Saitta, editors, *Methodologies for Intelligent Systems 3*. Elsevier Science Publishing Co., 1988.

[DL88] F. M. Donini and M. Lenzerini. Termlog: a logic for terminological knowledge. In Z. W. Ras and L. Saitta, editors, *Methodologies for Intelligent Systems 3*. Elsevier Science Publishing Co., 1988.

[EO86] J. Edelmann and B. Owsnicki. Data models in knowlege representation systems: A case study. In C.-R. Rolliner and W. Horn, editors, *Proceedings GWAI-86*, 1986.

[Fis92] M. Fischer. The integration of temporal operators into a terminological representation system. KIT-Report No. 99, Dept. of Computer Science, TU Berlin, 1992.

[Hei93] J. Heinsohn. ALCP - Ein hybrider Ansatz zur Modellierung von Unsicherheit in terminologischen Logiken. Dissertation, Universität des Saarlandes, 1993.

[HH92] J. Heinsohn and B. Hollunder, editors. *DFKI Workshop on Taxonomic Reasoning*. Number D-92-08 in Document. Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz, Saarbrücken, Germany, 1992.

[HKQ+93] T. Hoppe, C. Kindermann, J. Quantz, A. Schmiedel, and M. Fischer. BACK V5 tutorial and manual. KIT-Report No. 100, Dept. of Computer Science, TU Berlin, 1993.

[HN90] B. Hollunder and W. Nutt. Subsumption algorithms for concept languages. Research Report RR-90-04, Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz, Kaiserslautern, Germany, 1990.

[HR91] O. Herzog and C.-R. Rollinger, editors. *Text Understanding in LILOG*. Springer, 1991.

[JHP92] B. Nebel J. Heinsohn, D. Kudenko and H.-J. Profitlich. An empirical analysis of terminological representation systems. Research Report RR-92-16, Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz, Saarbrücken, Germany, 1992.

[KBR86] T. S. Kaczmarek, R. Bates, and G. Robins. Recent developments in NIKL. In *Proceedings of the 5th National Conference on Artificial Intelligence*, pages 978–985, 1986.

[Kem88] C. Kemke. Darstellung von Aktionen in Vererbungshierarchien. In W. Hoeppner, editor, *Proceedings GWAI-88*, pages 66–76, 1988.

[Kem91] C. Kemke. Die Darstellung von ungenauem Wissen in taxonomischen Wissensbasen. *KI*, 2:12–19, 1991.

[Kob89] A. Kobsa. The SB-ONE knowledge representation workbench. Report No. 21, Dept. of Computer Science, University of Saarbrücken, W.Germany, 1989.

[MB87] R. MacGregor and R. Bates. The LOOM knowledge representation language. Technical Report ISI/RS-87-188, Information Sciences Institute, USC, Marina Del Rey, CA, 1987.

[MB88] R. MacGregor and D. Brill. LOOM user manual. Technical report, USC / Information Sciences Institute, Marina del Rey, CA, 1988.

[Neb90] B. Nebel. *Reasoning and Revision in Hybrid Representation Systems*. Springer, 1990.

[Neu93] A. Neuwirth. Inferences for temporal object descriptions in a terminological representation system: Design and implementation. KIT-Report No. 107, Dept. of Computer Science, TU Berlin, 1993.

[NvL88] B. Nebel and K. von Luck. Hybrid reasoning in back. In W. R. Zbigniew and S. Lorenza, editors, *Methodologies for Intelligent Systems, 3*, pages 260–269, Amsterdam, 1988. North-Holland.

[Pro92] H.-J. Profitlich. RAT - representation of actions in terminological logics. In J. Heinsohn and B. Hollunder, editors, *DFKI Workshop on Taxonomic Reasoning*, number D-92-08 in Document, pages 16–22. Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz, Saarbrücken, Germany, 1992.

[Qui60] W. V. Quine. *Word and Object*. Cambridge, MA, 1960.

[Rob86] G. Robins. The NIKL manual. Technical report, USC / Information Sciences Institute, Marina del Rey, CA, 1986.

[Sch72] R. C. Schank. Conceptual dependency: A theory of natural language understanding. *Cognitive Psychology*, 3:552–631, 1972.

[Sch90] B. Schmitz. Zur Wissensrepräsentation in der maschinellen Übersetzung - Die mögliche Verwendung von KL-ONE. KIT-Report No. 80, Dept. of Computer Science, TU Berlin, 1990.

[SL83] J. G. Schmolze and T. Lipkis. Classification in the KL-ONE knowledge representation system. In *Proceedings of the 8th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pages 330–332, 1983.

[SR74] R. C. Schank and C. J. Rieger. Inference and the computer understanding of natural language. *Artificial Intelligence*, 4(5):373–412, 1974.

[SS88] S. W. Smoliar and W. Swartout. A report from the frontiers of knowledge representation. Technical report, USC Information Sciences Institute, Marina del Rey, CA, 1988.

[SSSar] M. Schmidt-Schauß and G. Smolka. Attributive concept descriptions with complements. *Artificial Intelligence*, To apppear.

[Vil85a] M. Vilain. An approach to hybrid knowledge representation. Technical report, BBN Laboratories, Cambridge, MA, 1985.

[Vil85b] M. Vilain. The restricted language architecture of a hybrid representation system. In *Proceedings of the 9th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pages 545–551, 1985.

[vLNPS87] K. von Luck, B. Nebel, C. Peltason, and A. Schmiedel. The anatomy of the BACK system. KIT-Report No. 41, Dept. of Computer Science, TU Berlin, 1987.

[WMA+86] R. Wilensky, J. Mayfield, A. Albert, D. Chin, C. Cox, M. Luria, J. Martin, and D. Wu. UC - a progress report. Technical Report UCB/CSD 87/303, Computer Science Division, University of California, Berkeley, CA, 1986.

[Woo75] W. A. Woods. What's in a link: Foundations for semantic networks. In D. G. Bobrow and A. M. Collins, editors, *Representation and Understanding: Studies in Cognitive Science*. Academic Press, New York, 1975.